

*Gudd, Nora; Rudolph, Horst; Schierz, Christoph; Vandahl, Cornelia:*

***Subjektive Bewertung der Helligkeit in Räumen mit unterschiedlichen Lichtfarben***

---

*Zuerst erschienen in:*

Licht 2008 : Ilmenau, 10. bis 13. September 2008 ; 18. Gemeinschaftstagung / [Veranst.:] Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V.; Lichttechnische Gesellschaft Österreichs; Schweizer Licht Gesellschaft; Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde; Technische Universität Ilmenau. - Berlin : LiTG, ISBN 978-3-927787-34-6. - 2008, insges. 8 S.

# Subjektive Bewertung der Helligkeit in Räumen mit unterschiedlichen Lichtfarben

Nora Gudd  
TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik  
PF 100 565, 98693 Ilmenau

Dipl.-Ing. Horst Rudolph  
Forschung und Entwicklung / Research and Development  
TRILUX GmbH & Co. KG  
Postfach 19 60 · D-59753 Arnsberg

Prof. Dr.-Ing. Christoph Schierz, TU Ilmenau  
Dr.-Ing. Cornelia Vandahl, TU Ilmenau

## 1 Einleitung

Mit Hilfe der Bewertung durch die  $v(\lambda)$ -Kurve ist die Beleuchtungsstärke eine objektiv messbare Größe. Im Unterschied dazu ist die Helligkeit eine subjektive Lichtempfindung. Zur Bestimmung der  $v(\lambda)$ -Kurve werden Versuchspersonen am gleichen Ort abwechselnd zwei verschiedene Lichter gezeigt, die sich in Farbe und Helligkeit unterscheiden. Sie müssen die Helligkeit des Testlichts variieren, bis für sie kein Unterschied mehr zu sehen ist. Dabei macht man sich das Flimmerprinzip zu nutze: Die Farbverschmelzungsfrequenz liegt unterhalb der der Helligkeit. Wenn sich die Lichter mit einer Frequenz oberhalb der Farb- aber unterhalb der Helligkeitsverschmelzungsfrequenz abwechseln, dann sieht die Versuchsperson nur ein Helligkeitsflimmern bei einem Helligkeitsunterschied zwischen Test- und Vergleichslicht. Es wird ein heterochromatischer Vergleich auf einen quasi-isochromen zurückgeführt. Durch die Verwendung dieser Technik wird also nur die achromatische Komponente der Helligkeit bei der Messung der  $v(\lambda)$ -Kurve berücksichtigt. Kingsmith und Carden stellten fest, dass wenn die Frequenz, mit der die Lichter gezeigt werden, verringert wird (auf 1 Hz, sonst 25 Hz), wird eine Empfindlichkeitskurve mit drei Peaks gemessen, die in den Regionen der Maxima der Empfindlichkeitskurven der drei Zapfentypen des menschlichen Auges liegen. Fotios und Levermore folgern, dass bei der Definition der Beleuchtungsstärke wegen der Bewertung mit der spektralen Hellempfindlichkeitskurve die chromatischen Aspekte des Lichts nicht berücksichtigt wurden. Und das würde bedeuten, dass es einen Unterschied zwischen der subjektiv wahrgenommenen Helligkeit und der objektiv messbaren Beleuchtungsstärke gibt.

## 2 Untersuchung

### 2.1 Aufgabenstellung

In dieser Studie wird untersucht, ob Menschen unterschiedliche Lichtfarben unterschiedlich hell wahrnehmen und wenn ja wie. Aus diesem Grund wurde der Zusammenhang in Bezug auf die wahrgenommene Helligkeit der Lichtfarben tageslichtweiß<sup>1</sup> und warmweiß<sup>2</sup> bei drei Beleuchtungsstärkeniveaus (250 lx, 500 lx und 1000 lx) getestet.

Dazu wurden Untersuchungen zum Einen in zwei nebeneinander liegenden Räumen – Büros nachempfunden – und zum Anderen in einem Simulator – zwei nebeneinander stehende Kammern – durchgeführt. Dabei hatten Probanden die Aufgabe, gleiche

---

<sup>1</sup> = „tw“; Farbtemperatur  $T_F = 6500$  K

<sup>2</sup> = „ww“;  $T_F = 2700$  K

Helligkeit in beiden Räumen bzw. Kammern durch Variation der Beleuchtungsstärke in einem der beiden Räume bzw. Kammern einzustellen.

## 2.2 Versuch „Büro“

Mit Hilfe von Fragebögen wurde das subjektiven Empfinden der Versuchspersonen in Abhängigkeit von der Lichtfarbe abgefragt. Außerdem stellten die Versuchspersonen die Lichtmenge ein. Man erhielt somit exakte Beleuchtungsstärkewerte – die vom Versuchsleiter vorgegebenen und die von dem Probanden eingestellte, die miteinander verglichen und in Beziehung zueinander gesetzt werden können.

### 2.2.1 Beschreibung des Versuchsaufbau

Der Versuch fand bei der Trilux GmbH & Co. KG in Arnsberg statt. Als Versuchsräume dienten zwei nebeneinander liegende Büros, die spiegelverkehrt aufgebaut waren. Die Abmaße der Räume betrugen für den linken Raum 5,94 m x 3,30 m und für den rechten Raum 5,94 m x 3,40 m (siehe Abb. 2-1 und Abb. 2-2).

Eingerichtet waren sie mit farbneutralen Möbeln – zwei Schreibtische (2,0 m x 0,8 m) und ein schwarzer Schreibtischstuhl (ca. 0,63 m x 0,5 m) – und die Fenster wurden mit weißen Holzplatten lichtdicht verschlossen.



Abb. 2-1: linker Raum



Abb. 2-2: rechter Raum

Die Büros wurden jeweils von vier BLUEmotion H IPX 380 EDD von der Firma Trilux GmbH & Co. KG beleuchtet. Diese Leuchten haben einen Indirekt- und einen Direktanteil. Mittels einer DALI-Fernbedienung konnte das Licht gedimmt werden.

Verbunden waren die beiden Räume über einen Flur. Die Entfernung zwischen den Türen betrug von Tür-Mitte zu Tür-Mitte 5,27 m.

### 2.2.2 Versuchsdurchführung

Insgesamt nahmen 40 Personen an dem Versuch teil. 38% der Probanden waren weiblich, 70% Mitarbeiter von Trilux und 30 % firmenexterne Versuchspersonen. Die Probanden waren zwischen 19 und 57 Jahre alt, das Durchschnittsalter betrug 35 Jahre.

Die Versuchspersonen, die bei Trilux arbeiten, glichen alle vier Lichtfarbenkombinationen (tw/tw<sup>3</sup>, ww/ww, tw/ww<sup>4</sup>, ww/tw) ab. Dazu nahmen sie an den vier Tests an unterschiedlichen Tagen teil. Ein Test dauerte jeweils ca. 15 Minuten. Die Tests, die die externen Versuchspersonen durchführten, dauerten jeweils 1,5 h. Die externen Probanden führten aus Zeitgründen die Abgleiche bei nur zwei Lichtfarbenkombinationen durch, wobei einmal in beiden Räumen gleiche Lichtfarbe und einmal unterschiedliche Lichtfarben herrschten.

---

<sup>3</sup> Abgleich von tageslichtweiß mit tageslichtweiß

<sup>4</sup> Abgleich von warmweiß mit tageslichtweiß: Vorgabe des Beleuchtungsstärkeniveaus bei tw, Variierung der Beleuchtungsstärke bei ww

Pro Test wurden drei Abgleiche durchgeführt, für jedes Beleuchtungsstärkeniveau ein Abgleich. Die Reihenfolge der Beleuchtungsstärkeniveaus war entweder 250 lx - 500 lx - 1000 lx oder 1000 lx - 500 lx - 250 lx. Jede Versuchsperson stellte stets im gleichen Raum die Beleuchtungsstärke ein, in etwa die Hälfte der Versuchspersonen im linken Raum und der Rest im rechten Raum. Jeder Proband begann die Hälfte seiner Tests mit 250 lx und die andere Hälfte mit 1000 lx.

Die Reihenfolge der Lichtfarbenkombinationen war willkürlich. Es wurde versucht, dass die Anzahl der Personen, die die Abgleiche durchführten, bei allen Lichtfarbenkombinationen in etwa gleich war.

Der Ablauf des Tests sah für eine Lichtfarbenkombination folgendermaßen aus:

In Raum 1 und in Raum 2 war das Beleuchtungsstärkeniveau 1 eingestellt. Nach einer kurzen Einweisung in Raum 1 ging die Versuchsperson in Raum 2 und stellte dort die Helligkeit des Lichts so ein, dass beide Räume für sie gleich hell wirkten. Sie hatte die Möglichkeit hin und her zugehen, um ihre Einstellung zu überprüfen. Nach der Messung der mittleren Beleuchtungsstärke in beiden Räumen wurde das Beleuchtungsstärkeniveau 2 in beiden Räumen eingestellt und nachdem er einen Fragebogen – je nach Lampenkombination entweder zu seinen Sozialdaten (z.B. Alter) (gleiche Lichtfarbe) oder zum subjektiven Empfinden der dargebotenen Lichtsituation sowie zum daraus entstehenden Raumeindruck (unterschiedliche Lichtfarbe) – in Raum 1 ausgefüllt hatte, führte der Proband den zweiten Abgleich durch. Zum Schluss stellte die Versuchsperson nach einem Farbsehtest in Raum 1 beim dritten Beleuchtungsstärkeniveau das Licht wieder in Raum 2 ein.

### **2.2.3 Auswertung**

Im folgenden Kapitel werden die durch den Versuch erlangten Daten ausgewertet. Dies geschieht unter Anderem mit Hilfe von statistischen Tests.

#### **2.2.3.1 Auswertung der Fragebögen**

Jede Versuchsperson musste die Lichtsituation bei einer mittleren Beleuchtungsstärke von 500 lx und einer Lichtfarbe von 2700 K bzw. 6500 K einschätzen und den Raumeindruck angeben. Beides wurde mit Hilfe eines Fragebogens abgefragt. Die Versuchspersonen konnten auf einer Skala von 1 – 21 entscheiden, zu welchem der Extrempole eines Eigenschaftspaars sie mehr tendierten.

Die Auswertung der Fragebögen ergab, dass die Probanden die warmweiße Lichtfarbe eher mit positiven Eigenschaften, wie beruhigend oder Behaglichkeit vermittelnd, verbanden, während das tageslichtweiße Licht auf sie eher anstrengend oder unnatürlich wirkte. Allerdings empfanden die Versuchspersonen Licht mit einer Farbtemperatur von 2700 K als eher ermüdend. Die positiven Eigenschaften führen beim Einsatz dieser Lichtfarbe z.B. in einem Büro dazu, dass sich die Person dort wohl fühlt. Allerdings sollte Licht in einem Büro mit der Eigenschaft „ermüdend“ nicht eingesetzt werden.

Außerdem empfanden die Probanden das Licht mit der Lichtfarbe „tageslichtweiß“ eher als hell, während sie bei dem warmweißen Licht keine Entscheidung zwischen hell und dunkel treffen konnten.

#### **2.2.3.2 Auswertung der Beleuchtungsstärkedifferenzen**

Die Aufgabe der Versuchspersonen lag darin, die beiden Räume auf gleiche Helligkeit abzugleichen, es wurde in einem Raum die Beleuchtungsstärke vorgegeben und in dem anderen von den Probanden variiert.

Dabei entstand pro Versuchsperson eine Differenz aus der von den Probanden variierten mittleren Beleuchtungsstärke  $E_{Pro,i}$  zur vorgegebenen mittleren Beleuchtungsstärke  $E_{Niv,i}$ :

$$\Delta E_i = E_{Pro,i} - E_{Niv,i}^5.$$

Im Folgenden werden die Ergebnisse statistisch ausgewertet.

### **Gleiche Lichtfarbe in beiden Räumen**

Beim Abgleich von tageslichtweiß mit tageslichtweiß bzw. von warmweiß mit warmweiß ergaben sich die in Tab. 2-1 stehenden Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenz  $\Delta E$ .

Mit Hilfe des t-Tests für gepaarte Stichproben kann nachgewiesen werden, dass für alle Beleuchtungsstärkeniveaus die von den Versuchspersonen variierte Beleuchtungsstärke  $E_{Pro}$  nicht signifikant von dem vorgegebenen Beleuchtungsstärkeniveau  $E_{Niv}$  abweicht bzw. sich die Differenz nicht signifikant von 0 unterscheidet ( $p > 0,05$ ).

Die im folgenden Kapitel ausgewerteten Tests unterscheiden sich von dem in diesem Kapitel ausgewerteten nur dadurch, dass in beiden Räumen unterschiedliche Lichtfarben herrschten. Ansonsten ist alles andere gleich geblieben. Da die Beleuchtungsstärkedifferenz nicht signifikant von 0 abweicht und die Lichtfarbe die einzige Variable ist, die sich ändert, lässt sich daraus folgern, dass eventuell auftretende Beleuchtungsstärkedifferenzen bei unterschiedlicher Lichtfarbe in beiden Räumen das Ergebnis der Lichtfarbenunterschiede und nicht irgendwelcher äußerer Einflüsse sind.

### **Unterschiedliche Lichtfarbe in beiden Räumen**

Wenn in beiden Räumen eine unterschiedliche Lichtfarbe vorherrschte, die Versuchspersonen also entweder die Beleuchtungsstärke in dem Raum mit tageslichtweißem Licht vorgegeben bekamen und die Lichtmenge im Raum mit warmweißem Licht so einstellen mussten, dass die Räume gleich hell erschienen oder umgekehrt, dann ergaben sich folgende arithmetische Mittelwerte der Beleuchtungsstärkedifferenzen  $\Delta E$  und ihre Standardabweichungen:

	tw/tw		ww/ww		tw/ww		ww/tw	
	$\overline{\Delta E}^6$	$S_{\Delta E}^7$	$\overline{\Delta E}$	$S_{\Delta E}$	$\overline{\Delta E}$	$S_{\Delta E}$	$\overline{\Delta E}$	$S_{\Delta E}$
250 lx	4,91	45,72	-12,77	51,27	20,46	87,24	5,46	83,16
500 lx	64,33	179,96	-9,06	152,35	147,03	282,68	8,09	153,70
1000 lx	17,30	201,91	-40,94	196,76	443,92	599,87	5,60	309,25

Tab. 2-1: Mittelwert und Standardabweichung der Differenz  $\Delta E$

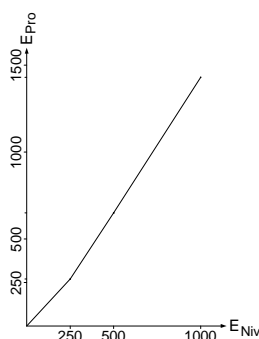


Abb. 2-3: Beleuchtungsstärke bei tw/ww

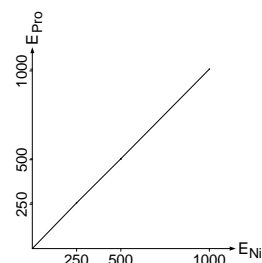


Abb. 2-4: Beleuchtungsstärke bei ww/tw

<sup>5</sup> Das in dieser Arbeit verwendete  $\Delta E$  steht für eine Differenz aus zwei Beleuchtungsstärkewerten und nicht – wie oft üblich – für eine Farbunterschied.

<sup>6</sup> arithmetischer Mittelwert von  $\Delta E_i$

<sup>7</sup> Standardabweichung der Größe  $\Delta E$

Mit Hilfe des t-Tests für gepaarte Stichproben kann nur ein signifikanter Unterschied von der vorgegebenen Beleuchtungsstärke zur eingestellten bei der Kombination tw/ww bei den Beleuchtungsstärkeniveaus 500 lx und 1000 lx nachgewiesen werden ( $p < 0,05$ ). Sowohl bei allen drei Beleuchtungsstärkeniveaus der Kombination ww/tw als auch bei dem Niveau von 250 lx bei tw/ww wurden die Beleuchtungsstärken von den Probanden nicht signifikant größer oder kleiner eingestellt ( $p > 0,05$ ). Wie bei den gleichen Lichtfarben unterscheiden sich die Ergebnisse des Wilcoxon-Tests nicht von denen des t-Tests.

Bei der Lichtfarbenkombination tw/ww bei der mittleren Beleuchtungsstärke von 500 lx bzw. 1000 lx war  $\overline{\Delta E}_{tw/ww} = E_{Pro} - E_{Niv} = E_{ww} - E_{tw} > 0$ . Dies bedeutet, dass die Probanden eine höhere Beleuchtungsstärke einstellten, dass sie den Raum mit dem warmweißen Licht dunkler empfanden als den Raum mit dem tageslichtweißen Licht.

Daraus folgt, dass in einem mit einer Lichtfarbe mit höherer Farbtemperatur beleuchteten Raum weniger Beleuchtungsstärke benötigt wird, um das gleiche Helligkeitsempfinden hervorzurufen wie in einem Raum, der von Licht mit einer geringeren Farbtemperatur beleuchtet wird. In diesem Versuch beträgt die Abnahme der Beleuchtungsstärke bei 6500 K gegenüber der bei 2700 K bei 500 lx ca. 30 % (150 lx) und bei 1000 lx 44 % (440 lx).

## 2.3 Versuch „Simulator“

Um die Ergebnisse aus dem vorherigen Versuch zu überprüfen, wurde er noch einmal – in leicht veränderter Form – durchgeführt, allerdings ohne die Befragung mit Hilfe von Fragebögen.

### 2.3.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Der Versuch ähnelt – wie oben bereits erwähnt – dem Vorherigen. Allerdings glichen die Probanden keine Räume ab, sondern zwei Kammern. Eine große Box wurde unterteilt, so dass zwei Kammern entstanden. Diese Box befand sich in einem abgedunkelten Raum. Die Versuchspersonen saßen auf einem Stuhl vor der Box und konnten beide Kammern gleichzeitig sehen. Es wurde mittels einer Blende verhindert, dass sie direkt in die Lampen sehen konnten (siehe Abb. 2-5). Die Innenmaße für die Box, die auf einem 72,5 cm hohen Tisch stand, betrugen 128 cm x 82,5 cm x 72,5 cm bzw. für die Kammern 63 cm x 82,5 cm und 64,5 cm x 82,5 cm. Die Innenseiten der Box waren mit grauer Pappe bzw. weißem Papier ausgelegt.



Abb. 2-5: Photo der Box



Abb. 2-6: Simulator mit verschiedenen Lichtfarben (links: tw, rechts: ww)

Beleuchtet wurde die Box von insgesamt acht 36 W T8-Leuchtstofflampen, wobei jeweils eine Hälfte der Lampe mittels eines Rohres abgedeckt wurde, so dass eine Kammer von vier Leuchtstofflampen beleuchtet wurde. Die Lampen konnten in Gruppen von einer bis drei Lampen mit Hilfe eines PC angesteuert und somit unter Anderem über die Cursor Tasten gedimmt werden. Es stehen insgesamt 255 Dimmstufen zur Verfügung.

Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin – wie im vorherigen Versuch – die Helligkeit in einer der beiden Kammern bei den drei Beleuchtungsstärkeniveaus 250 lx,

500 lx und 1000 lx anzugleichen. Verwendet wurden wieder 865er und 827er Leuchtstofflampen. Zur Kontrolle führten die Probanden den Abgleich tw/tw durch. Für diesen Abgleich wurde jeweils eine Leuchtstofflampe verwendet (= Testlampen), so dass für die Abgleiche tw/ww bzw. ww/tw pro Lichtfarbe drei Leuchtstofflampen zur Verfügung standen.

### 2.3.2 Versuchsdurchführung

Insgesamt nahmen 31 Personen an dem Versuch teil. 45 % Probanden waren weiblich. Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 29,5 Jahre, die jüngste Versuchsperson war 22 Jahre und die älteste 59 Jahre alt.

Der Test dauerte ca. 60 min und dabei wurden folgende Kombinationen getestet: tw/ww, ww/tw und tw/tw bei den Beleuchtungsstärkenniveaus 250 lx, 500 lx und 1000 lx (bei tw/tw: keine 1000 lx). Die Probanden glichen pro Kombination und Beleuchtungsstärkenniveau die beiden Kammern fünfmal ab, so dass insgesamt 40 Abgleiche durchgeführt wurden. Erst testeten die Versuchspersonen die beiden Kombinationen mit den unterschiedlichen Lichtfarben und anschließend die Kombination tw/tw. Entweder war die Abfolge der Beleuchtungsstärkenniveaus 250 lx - 500 lx - 1000 lx oder 1000 lx - 500 lx - 250 lx. Während der Abgleiche mit den unterschiedlichen Lichtfarben brannten die Lampen für den Abgleich tw/tw (Testlampen) auf Dimmstufe 1. Bei einer Lichtfarbenkombination stellten die Versuchspersonen das Licht immer in der gleichen Kammer ein.

Die Versuchspersonen wurden so aufgeteilt, dass jeweils in etwa die Hälfte der Probanden mit der Lichtfarbenkombination tw/ww, mit dem Beleuchtungsstärkenniveau 250 lx und in der linken Kammer mit den Abgleichen begannen.

Der Ablauf sah wie folgt aus:

In beiden Kammern herrschte das Beleuchtungsstärkenniveau 1, die erste Lichtfarbenkombination war 1/2. Nach einer kurzen Einweisung variierte die Versuchsperson die Helligkeit in der Kammer 1 ein, bis beide Kammern gleich hell erschienen. Die mittleren Beleuchtungsstärken in beiden Kammern wurden gemessen und notiert. Danach glich der Proband bei dem Beleuchtungsstärkenniveau 2 und 3 ab und der Versuchsleiter stellte wieder das Beleuchtungsstärkenniveau 1 ein. Diese Prozedur wurde anschließend viermal wiederholt.

Der Ablauf bei der Lampenkombination 2/1 war der gleiche, nur variierte die Versuchsperson die Helligkeit in der Kammer 2 mit dem Startbeleuchtungsstärkenniveau 3.

Um die Lichtfarbe tageslichtweiß mit tageslichtweiß abgleichen zu können, machte der Versuchsleiter alle Lampen außer den Testlampen aus und stellte in beiden Kammern das Beleuchtungsstärkenniveau 1 an. Die Versuchsperson veränderte wieder in der Kammer 1 die Beleuchtungsstärke. Bei dieser Kombination wurden insgesamt zehn Abgleiche durchgeführt.

### 2.3.3 Auswertung der Beleuchtungsstärkedifferenzen

Die Auswertung der Beleuchtungsstärkedifferenzen erfolgt analog zu der des vorherigen Versuchs. Als Ergebnis des Abgleichs der beiden Kammern erhält man zum Einen das mittlere Beleuchtungsstärkenniveau, das in der einen Kammer vorgegeben wird und zum Anderen die von den Probanden variierte mittlere Beleuchtungsstärke. Pro Lichtfarbenkombination und Beleuchtungsstärkenniveau glichen die Versuchspersonen fünfmal ab und aus diesen Werten wurden dann die Mittelwerte –  $E_{Niv,i}$  und  $E_{Pro,i}$  – und die Differenz errechnet:

$$\Delta E_i = E_{Pro,i} - E_{Niv,i}$$

### **Gleiche Lichtfarbe in beiden Kammern**

In Tab. 2-2 sind die beim Abgleich von tageslichtweiß mit tageslichtweiß entstandenen Mittelwerte und Standardabweichungen für alle Probanden aufgeführt.

Wie beim vorherigen Versuch wurden die Mittelwerte hinsichtlich ihrer statistischen Signifikanz untersucht. Das Ergebnis des t-Tests für gepaarte Stichproben war, dass die Differenzen nicht signifikant von 0 abwichen, die Probanden stellten die Beleuchtungsstärken also nicht signifikant anders ein ( $p > 0,05$ ). Das bedeutet, dass das Licht in beiden Kammern also nicht unterschiedlich wahrgenommen wurde, so dass eventuell auftretende Unterschiede bei unterschiedlichen Lichtfarben in beiden Kammern ihre Ursache in der Farbtemperaturdifferenz haben.

### **Unterschiedliche Lichtfarbe in beiden Kammern**

Aus den von den Probanden variierten Beleuchtungsstärken und dem vorgegebenen Beleuchtungsstärkeniveau ergaben sich für alle Versuchspersonen folgende Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenz  $\Delta E$ :

	tw/tw		tw/ww		ww/tw	
	$\overline{\Delta E}$	$S_{\Delta E}$	$\overline{\Delta E}$	$S_{\Delta E}$	$\overline{\Delta E}$	$S_{\Delta E}$
250 lx	8,44	46,58	8,75	43,83	7,72	47,32
500 lx	15,76	91,57	38,87	105,71	11,09	76,29
1000 lx			85,63	207,85	1,71	163,81

Tab. 2-2: Mittelwert und Standardabweichung der Differenz  $\Delta E$

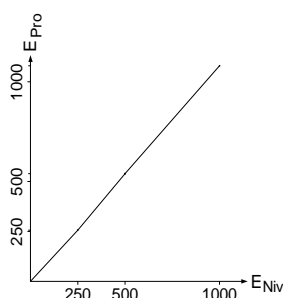


Abb. 2-7: Beleuchtungsstärke bei tw/ww

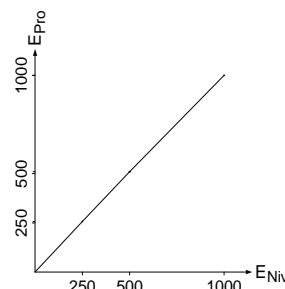


Abb. 2-8: Beleuchtungsstärke bei ww/tw

Mit Hilfe der t-Tests für gepaarte Stichproben wird untersucht, ob der Unterschied zwischen den variierten und den vorgegebenen Beleuchtungsstärken signifikant ist. Bei dem Abgleich von tageslichtweiß auf warmweiß unterscheidet sich die Differenz nicht signifikant von 0, unabhängig von dem Beleuchtungsstärkeniveau ( $p > 0,05$ ). Dies ist ebenfalls bei dem Abgleich tw/ww bei 250 lx der Fall. Bei 500 lx und 1000 lx haben die Probanden einen signifikant anderen Wert eingestellt ( $p < 0,05$ ).

Bei der Kombination tw/ww war  $\overline{\Delta E}_{tw-ww} = E_{Pro} - E_{Niv} = E_{ww} - E_{tw} > 0$ . Das bedeutet, dass bei 500 lx und 1000 lx das Licht mit der warmweißen Lichtfarbe dunkler empfunden wurde als das mit der tageslichtweißen Lichtfarbe und somit die Probanden die Beleuchtungsstärke beim warmweißen Licht höher einstellten.

Die Differenz betrug ca. 40 lx bzw. 85 lx. Damit lag die Abnahme bei einem Beleuchtungsstärkeniveau von 500 lx bzw. 1000 lx bei 8 % bzw. 8,5% von 6500 K gegenüber 2700 K.

## **3 Zusammenfassung**

Die Auswertung der Fragebögen aus dem Versuch „Büro“ ergab, dass die Probanden sich bei dem Eigenschaftspaar „hell – dunkel“ bei 6500 K eher für hell entschieden, während sie das Licht bei 2700 K weder als hell noch als dunkel empfanden. Das deutet darauf hin,



dass beim Abgleich von unterschiedlichen Lichtfarben ein Unterschied zwischen der vorgegebenen und der von den Versuchspersonen variierten mittleren Beleuchtungsstärke festzustellen ist.

Beide Versuche – „Büro“ und „Simulator“ – führen zu dem gleichen Ergebnis. Es stellte sich heraus, dass nur bei der Kombination tw/ww – also nur beim Abgleich von warmweiß mit tageslichtweiß – bei den Beleuchtungsstärkeniveaus 500 lx und 1000 lx ein signifikanter Unterschied zwischen der vorgegebenen mittleren Beleuchtungsstärke und der von den Probanden eingestellten mittleren Beleuchtungsstärke herrschte. Bei der Kombination ww/tw und bei 250 lx bei tw/ww wich die Differenz nicht signifikant von 0 ab. Es konnte also ein Unterschied zwischen der subjektiv wahrgenommenen Helligkeit und der objektiv messbaren Beleuchtungsstärke nachgewiesen werden, wenn die Lichtfarbe berücksichtigt wird. Das stimmt mit den Überlegungen zur Definition der Beleuchtungsstärke überein.

Ein signifikanter Unterschied trat auf, wenn die Probanden den dunkleren Raum auf den helleren abgleichen mussten, wenn man davon ausgeht, dass das tageslichtweiße Licht als heller wahrgenommen wird als das warmweiße. Wenn ihnen allerdings das Licht im dunkleren Raum vorgegeben wurde und sie den helleren einstellen mussten, dann war der Unterschied nicht signifikant. Ein Grund dafür könnten die unterschiedlichen Adaptationsmechanismen des menschlichen Auges sein. Beim Übergang von hell zu dunkel – man betritt z.B. ein dunkleres Zimmer – benötigt das menschliche Auge länger, um sich an die Dunkelheit zu gewöhnen als bei Adaptation von dunkel zu hell. Das könnte bedeuten, dass die Helligkeitsunterschiede von dunkel zu hell nicht so gut wahrgenommen werden, dass das Auge, sobald man den Raum betritt, schon auf das Niveau adaptiert hat.

Das Ergebnis des Abgleichs des Versuchs „Büro“ tritt aber auch bei dem Versuch „Simulator“ auf, bei dem die Probanden vor der Box saßen und beide Lichtfarben gleichzeitig sahen. Sie adaptieren also nicht auf eine der beiden Lichtfarben und Helligkeiten. Deshalb können die unterschiedlichen Adaptationsmechanismen – von hell auf dunkel bzw. von dunkel auf hell – nicht der einzige Grund sein. Ein Erklärungsmodell für das Phänomen gibt es im Moment nicht.

Über die Höhe der Abnahme der Beleuchtungsstärke bei Verwendung von Licht mit einer Farbtemperatur von 6500 K gegenüber 2700 K lassen sich für Büros keine exakten Aussagen machen. Die Probanden veränderten bei dem Versuch „Büro“ die Lichtmenge über eine Fernbedienung. Bei falscher Bedienung – wenn die Dimm-Taste nur kurz gedrückt wurde – ging das Licht aus, so dass die Versuchspersonen mit der Einstellung des Lichtes wieder von vorne beginnen mussten. Auch aus diesem Grund war das exakte Einstellen des Lichtes schwierig.

Eine weitere Fehlerquelle bei diesem Versuch könnte der Flur sein, der von Licht mit einer Farbtemperatur von 3000 K beleuchtet wurde. Trotz der im Vergleich zu den Büros geringen mittleren Beleuchtungsstärke (Höhe des Messrasters:  $h = 0,75\text{ m}$ ) von 15 lx – die geringste von den Probanden eingestellte mittlere Beleuchtungsstärke war 90 lx – kann dies die Versuchspersonen beeinflusst haben.

Die Ergebnisse von den beiden Versuchen weisen in die gleiche Richtung. Deshalb kann auf das aufwendigere Verfahren des Versuchs „Büro“ – Bereitstellung von zwei nebeneinander liegenden Räumen – verzichtet werden. Es ist also ausreichend, weitere Untersuchungen zu diesem Thema mit Hilfe des Simulators durchzuführen.

Die Angaben zu den hier verwendeten Quellen befinden sich auf der CD.